

平成 24 年度 卒業論文

シンチレーション光測定による
多ピクセル型光子検出器 MPPC 時間特性の評価

広島大学理学部物理科学科
クォーク物理学研究室
B095507 市間 俊宏

2013 年 2 月 8 日

指導教官：杉立徹教授

主査：杉立徹教授

副査：岡本宏己教授

概要

高エネルギー原子核衝突実験において、衝突反応直後に生成される熱光子はクォークとグルーオンが核子の閉じ込めから解放された「クォーク・グルーオン・プラズマ (QGP) 相」の探索において重要なプローブである。熱光子を検出する上で、信号と背景事象となる粒子とを識別するにはエネルギー分解能だけでなく高い時間分解能が要求される。そのため検出素子候補として、浜松ホトニクス社製の MPPC (Multi-Pixel Photon Counter) がある。MPPC はピクセル型光子検出器の 1 つであり、高時間分解能を有し、1 光子入射に対して感度のある検出素子である。

本研究では、宇宙線によるシンチレーション光を用いて、MPPC 時間応答の評価を行った。 $2\text{cm} \times 2\text{cm} \times 1\text{cm}$ のプラスチックシンチレーターに 2 個の MPPC と 2 個の PMT をそれぞれ正対する側面に取り付け、シンチレーション光の多面同時読み出し装置を製作し、宇宙線の測定を行った。測定データから宇宙線事象の選別を行い、時間測定に伴うスタートタイミングのゆらぎやシンチレーション光発生地点に依存するゆらぎを打ち消すパラメータを導入、出力波高に依存して発生する Time Walk Effect に対する補正を行い、MPPC の時間分解能を算出した。その結果、 $424.4 \pm 7.4[\text{ps}]$ という値が得られた。

目次

1 章 導入	4
1.1 高エネルギー原子核衝突実験	4
1.1.1 LHC 加速器	4
1.1.2 ALICE 実験	4
1.2 荷電粒子と物質との相互作用	4
1.2.1 シンチレーション光	4
1.2.2 宇宙線	5
1.3 MPPC	5
1.3.1 APD	5
1.3.2 MPPC	5
1.3.3 MPPC の特徴・諸性質	7
1.4 NIM と CAMAC	8
1.4.1 NIM	8
1.4.2 CAMAC	9
2 章 実験方法	10
2.1 宇宙線測定セットアップ	10
2.2 解析方法	14
2.2.1 宇宙線イベントの抽出	14
2.2.2 Time Walk Effect	15
2.2.3 時間分解能の計算	16
3 章 実験および解析結果と考察	18
3.1 宇宙線ヒストグラム	18
3.1.1 測定したそのままのヒストグラム	18
3.1.2 宇宙線以外のイベント除去後のヒストグラム	20
3.1.3 Time Walk Effect の補正	22

3.2	時間分解能	23
3.2.1	Time Walk Effect の補正を行ったデータによる時間分解能	23
3.3	時間分解能に関する考察	26
3.3.1	同時フィッティングによる時間分解能評価法	26
3.3.2	検出素子の組み合わせによる時間分解能評価	27

4 章	結論	29
------------	-----------	-----------

参考文献

謝辞

1 章 導入

1.1 高エネルギー原子核衝突実験

1.1.1 LHC (Large Hadron Collider) 加速器

LHC 加速器とは、スイス、フランスの国境をまたぐ世界最大のハドロン衝突型加速器である。欧州原子核機構 (CERN) が建設し、高エネルギーの粒子ビームを正面衝突させることで様々な素粒子反応を生成し、観測している。

1.1.2 ALICE 実験

ALICE 実験とは、A Large Ion Collider Experiment の略で、LHC で行われている素粒子実験の 1 つである。高エネルギー原子核の衝突実験に特化したグループで、衝突によってクォーク・グルーオンが核子の閉じ込め現象から開放されたクォーク・グルーオン・プラズマ (QGP) 相の探索を目的としている。QGP 相の性質を解明することにより、ビッグバン直後の初期宇宙の構造を理解することにもつながる。

QGP の探索を行う上で重要なプローブであるとされるのが、熱平衡状態での熱輻射によって放出される熱光子である。熱光子の観測は背景事象との識別が 1 つの課題となっており、検出器に高い時間分解能を要求する。

1.2 荷電粒子と物質との相互作用

本研究を行うにあたり、荷電粒子と物質との相互作用について述べる。

1.2.1 シンチレーション光

物質中を荷電粒子が通過した時、原子中の電子にエネルギーを与えて励起させ、それが元の状態に戻る際に発生する光をシンチレーション光といい、シンチレーション光を発生させる物質をシンチレーターと呼ぶ。シンチレーション光を測定することで、シンチレーターを通過した素粒子を検出することができる。シンチレーション光はそのままでは非常に微弱で、測定するには光を電気信号に変え、さらに増幅させる必要がある。そのような検出器の代表的な例として、光電子増倍管 (PMT) がある。今回行った実験でも PMT を使用している。また本研究の対象である MPPC もまた入射光子による信号を増幅し測定を行う検出器の 1 つである。

1.2.2 宇宙線

宇宙線とは大気圏外から地球大気中に降り注ぐ放射線の名称である。大気圏外からやってくる 1 次宇宙線のほとんどは陽子である。陽子は大気中の原子核と衝突し、2 次宇宙線を発生させる。2 次宇宙線はまず π 中間子が生成され、それが崩壊すると共に大量のミュオンが生成される。今回宇宙線として測っているのはこのミュオンである。

地表でミュオンは 10cm^2 に 1 秒あたり約 1 個の割合で降り注ぎ、物質中におけるエネルギー損失はおよそ $2\text{MeV}/\text{gcm}^{-2}$ である[1],[2]。

MPPC (Multi-Pixel Photon Counter)

1.3.1 APD (Avalanche Photo Diode)

APD とは、半導体をベースとした光子検出器で、p 型半導体と n 型半導体が接合され、間に異なるキャリア同士が打ち消しあった空乏層が出来ている。逆バイアス電圧をかけることで内部に電場が発生し、空乏層にバンドギャップ以上のエネルギーをもつ光子が入射することで生じた電子・正孔対が加速される。一定上の逆バイアス電圧を印加すると加速されたキャリアが同様に新たなキャリアを生み出し、雪崩的にキャリアが増倍され、電流が流れる。この増倍のことをアバランシェ増倍と言い、それが発生するときの逆バイアス電圧をブレイクダウン電圧と言う。ブレイクダウン電圧よりも高い逆バイアス電圧を印加すると、一光子の入射に対し一定のパルスを出す「ガイガーモード」と呼ばれる状態となる。

1.3.2 MPPC (Multi-Pixel Photon Counter)

MPPC とは浜松ホトニクス社が開発した光子検出器で、先に述べたガイガーモードの APD をピクセル状に配置したものである。光子が入射したそれぞれの APD から出力されたパルスの総和が MPPC の出力となるため、その出力の波高などから MPPC に入射した光子数を見積もる事ができる。

本研究に使用した MPPC は S10362-33-025C という型で、受光面は $3\text{mm} \times 3\text{mm}$ 、総ピクセル数は 14,400 ピクセルである。



図 1.1 MPPC (HAMAMATSU S10362-33-025C)

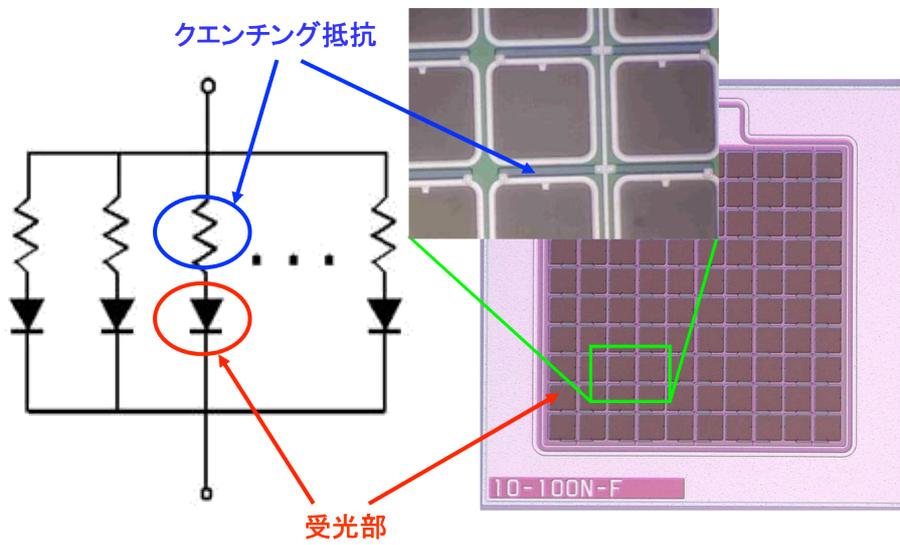


図 1.2 MPPC 等価回路[3]

1.3.3 MPPC の特徴、諸性質

MPPC の主な特徴として主に以下の点が挙げられる。

- ・ 小型、軽量である
- ・ 優れたフォトンカウンティング能力をもつ
- ・ 高い増幅率をもつ ($10^5 \sim 10^6$)
- ・ 高い時間分解能をもつ
- ・ 磁場の影響を受けない
- ・ 常温での動作が可能

上記のような優れた性能を持つ MPPC は、放射線測定装置や人体中の悪性腫瘍を画像化する装置などへの利用が期待され、それに向けた研究開発が現在進行している。高エネルギー原子核衝突における熱光子と背景事象との識別にも、高い時間分解能をもつ MPPC は有効であると期待され、検出素子の候補として挙げられている。本研究では、MPPC の「高い時間分解能」という点に着目し、それに対する評価を行なった。

MPPC の持ついくつかの性質について、以下で説明を行う。

ダークカウント

MPPC の各ピクセルで発生するノイズはガイガーモードの性質上、1 光子が入射したときと同じパルスを発生させる。このノイズをダークカウントといい、MPPC 測定時にはこのダークカウントによって検出光子数が本来入射した光子数よりも多くなる。

アフターパルス

各ピクセル中の空乏層に光子が入射し、電子、正孔対が生成されアバランシェ増倍される。この過程で電子が不純物などによって生じた格子欠陥にトラップされることがある。その後トラップされた電子が再放出され、異なるパルスとして検出される。これをアフターパルスという。

クロストーク

あるピクセルでアバランシェ増倍が起こった際に 2 次光子が発生し、その光子が隣接する別のピクセルに移りアバランシェ増倍を起こすことがある。1 光子入射に対し複数のピクセルでパルスが発生せるこの現象をクロストークという。

1.3 NIM と CAMAC

1.4.1 NIM

NIM モジュールとは Nuclear Instruments Modules の略であり、1960 年代に米国で制定された放射線測定モジュール標準規格、NIM 規格に基づき設計されている。NIM 規格におけるロジック信号は「0」を 0V、「1」を -0.8V で扱っている。本論文では NIM 信号と呼称する。

NIM モジュールは、電源となる NIM bin に挿入して使用する。1 台の NIM bin には最大 12 個のモジュールを挿入することができ、モジュール間を LEMO ケーブルで繋ぐことで回路を作製する。以下に、本研究で使用した NIM モジュールを挙げる。

DISCRIMINATOR

負の信号を入力し、閾値 (Threshold 電圧) を超えると NIM 信号を出力する。信号の幅と Threshold 電圧は調節することができる。各 PMT または MPPC からの出力を NIM 信号に変換するのに使用した。

GATE GENERATOR

NIM 信号を入力されると、任意の遅延、幅をもつ NIM 信号が出力される。本研究においては幅の調節用として使用した。

COINCIDENCE

複数の入力 (最大 4 つ) に対し、「1」が重なった時点で NIM 信号を出力する。

FAN IN/OUT

入力パルスに対し、反転させたものを出力する。PMT 出力が負のパルスであるのに対し、MPPC 出力が正のパルスであることから、それを負のパルスに変換するために使用した。

DELAY

NIM 信号を遅延させるためのモジュールであり。遅延時間をスイッチによって 0~31ns の間で調節できるものと、1ch あたり 50ns 遅延させるものを使用している。

VISUAL SCALER

入力信号をカウントし、表示する。各検出器からの出力に異常がないかどうかを確認する目安として使用した。

HIGH VOLTAGE POWER SUPPLY

PMT 及び MPPC の VIAS Voltage を供給する。

1.4.2 CAMAC

CAMAC とは Computer Automated Measurement and Control Standard の略であり、CAMAC モジュールが測定したデータをパソコンに転送することができる。CAMAC Crete に挿入して使用し、各モジュールは CAMAC Crete のバスを通じてデータをやり取りする。

CS-ADC REPIC 製 RPC-022

入力パルスの電荷量を測定するモジュール。CS とは Charge Sensitive の略で、これとは別にパルスの波高を測定する Peak Hold 型の ADC (PH-ADC) がある。16 のチャンネルの他に Gate があり、入力された NIM 信号の幅の間だけ電荷量を測定、積分する。0~1000pC まで測定することが可能である。逆に 1ch あたりは 0.25pC に相当する。また、ADC にはチャンネル毎に 100ch 前後のペDESTAL が存在し、ADC のデータを扱うときには事前に測ったペDESTAL の値との差をとっておく必要がある。

TDC REPIC 製 RPC-060

START に NIM 信号が入力されてから、各チャンネルに入力があるまでの時間を測定する。0~4095 ch まで測ることができる。本研究で使用したモジュールは、1ch あたり 25ps のものを使用している。

2 章 実験方法

2.1 宇宙線測定セットアップ

本実験では、MPPC の特性を評価するための光源として、宇宙線がプラスチックシンチレーターに入射することによって発生するシンチレーション光を用いる。観測用のシンチレーターは縦 2 cm、横 2 cm、厚さ 1 cm のものを使用した。しかしこの場合、宇宙線のシンチレーターへの入射位置によって得られる信号が変化してしまう。入射位置による効果を除去するため、2 個の MPPC をシンチレーター側面に正対するように取り付けた。また PMT についても同様に取り付けている。具体的な入射位置による効果の除去方法は後述する。

本セットアップでは ADC 及び TDC のトリガーとして、観測用のシンチレーターの上下を別のシンチレーターで挟み、上下を貫通したイベントを用いている。上下のシンチレーターで発生したシンチレーション光を PMT で測定し、それらの Coincidence (論理積) をとっている。つまり上下のシンチレーターを荷電粒子が貫通したときのイベントを抽出させている。上下のシンチレーターは縦 5 cm、横 5 cm、厚さ 0.5 cm のものを用いている。また、上下の PMT の取り付け方向は逆向きになっている。これは、シンチレーターと PMT の間にあるライトガイド並びに PMT そのものを宇宙線が通過した際にトリガーが反応することを防ぐためであり、シンチレーターで発生したイベントのみを汲み取っている。本論文では、中央に位置する観測用シンチレーターに取り付けられた 2 個の PMT を PMT1、PMT2、2 個の MPPC を MPPC1、MPPC2、トリガー用のシンチレーターに接続された PMT に関しては上を PMT3、下を PMT4 と呼称する。

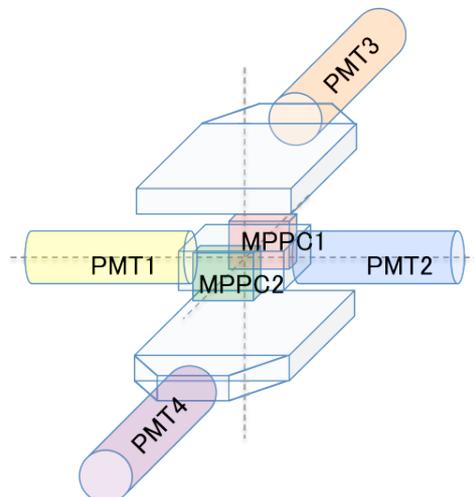


図 2.1 宇宙線測定用シンチレーター及び PMT,MPPC 配置図

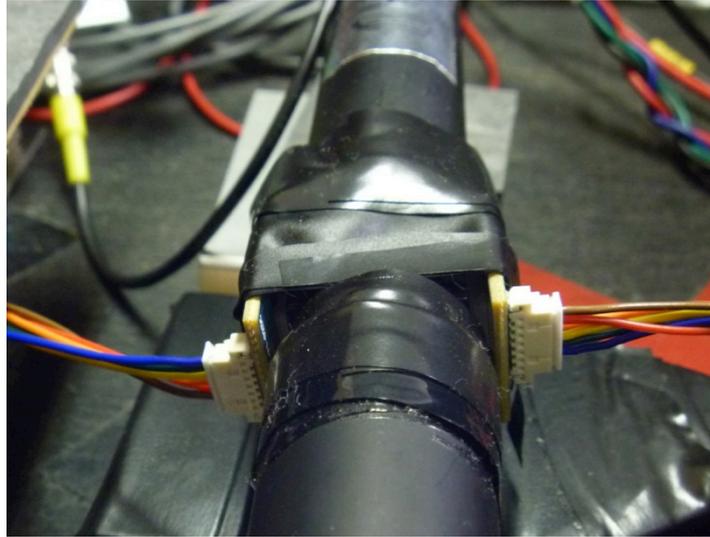


図 2.2 宇宙線測定用シンチレーター及び PMT,MPPC 配置の写真

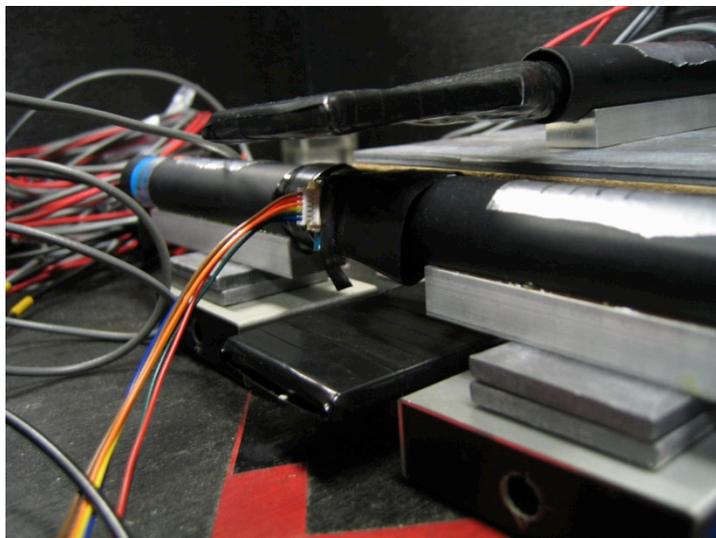


図 2.3 宇宙線測定用シンチレーター及び PMT,MPPC 配置の写真
(別角度より)

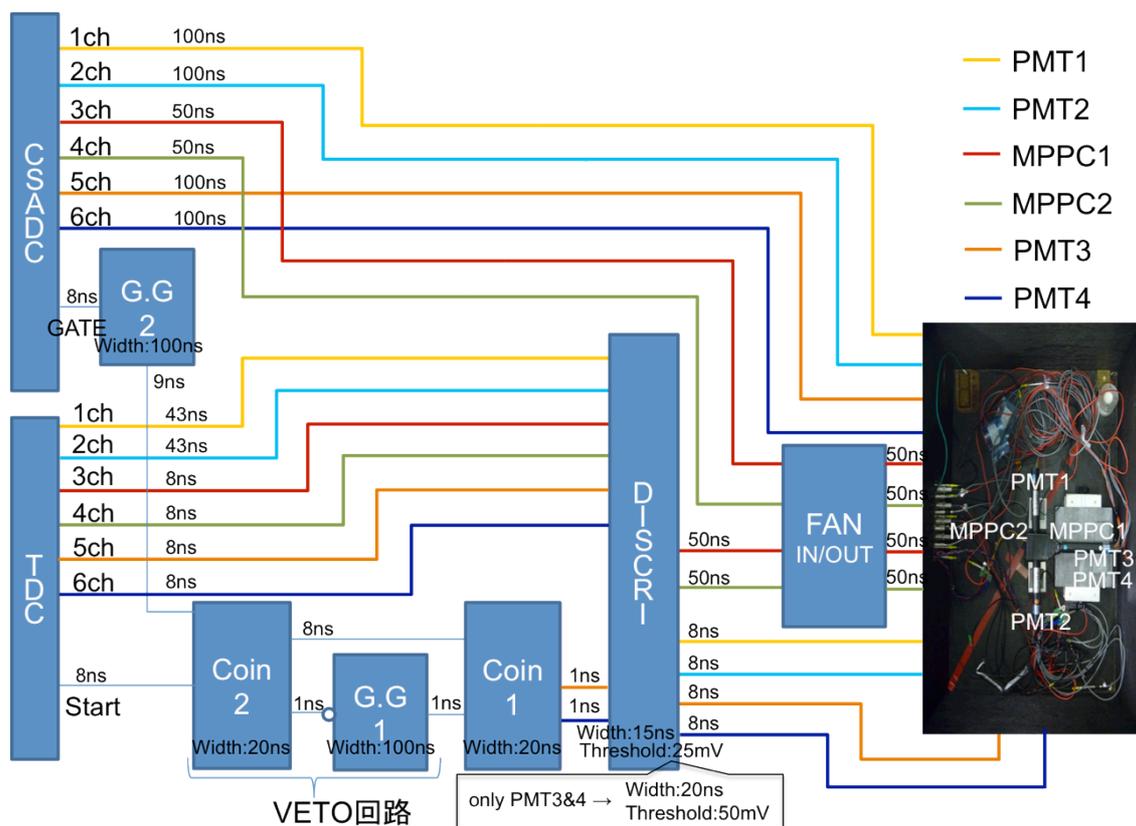


図 2.4 宇宙線測定用セットアップ 回路図

検出器類は暗箱内に設置し、さらに上から暗幕をかけるなどして照明等の光が入らないようにした。

PMT の出力信号は負であるのに対し、MPPC の出力信号は正であるため、MPPC からの出力を FAN-IN/OUT で反転させている。その後 ADC への入力はそのままの信号を、TDC への入力は DISCRIMINATOR を通し NIM 信号へ変換したものを入れている。ADC の GATE 及び TDC の START へ入力するトリガー信号は、PMT3、PMT4 の NIM 出力信号を COINCIDENCE に入れ、その出力を用いている。間には VETO 回路を組み込み、トリガー信号の間隔を広げている。

PMT の VIAS Voltage は全て $-1700[V]$ で統一し、MPPC の VIAS Voltage については MPPC1 を $71.6[V]$ 、MPPC2 を $71.9[V]$ としている。

このようなセットアップを用い、合計 30,000 イベントを測定した。

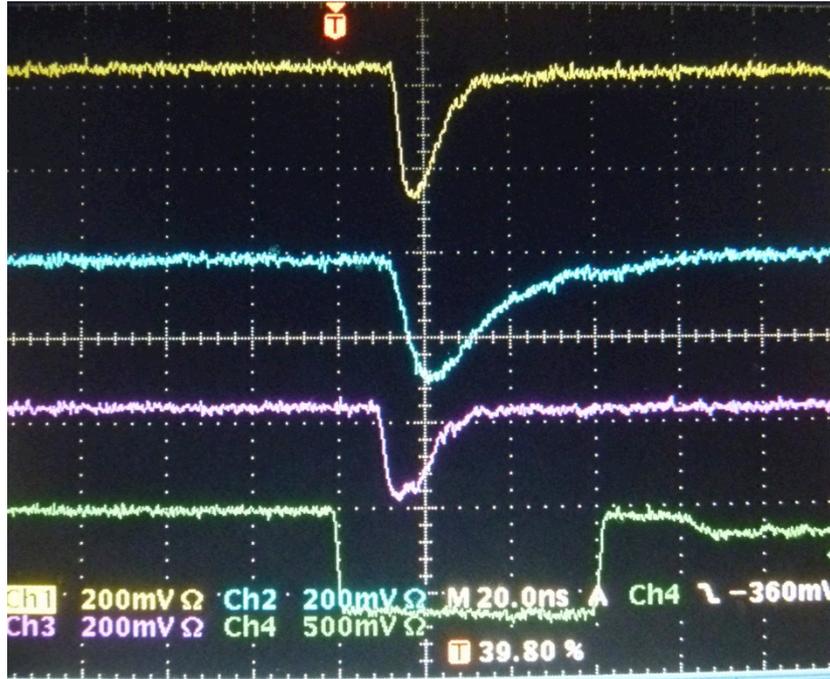


図 2.5 ADC 入力のオシロスコープ波形
上から PMT3、PMT1、MPPC1、GATE



図 2.6 TDC 入力のオシロスコープ波形
上から PMT3、PMT1、MPPC1、START

2.2 解析手法

2.2.1 宇宙線イベントの抽出

取得したデータには不要なイベントが多く含まれている。時間応答の評価を行う前に、まずは中央のシンチレーターを通過し、シンチレーション光を発生させたイベントを取り出す必要がある。ヒストグラムから以下の不要なイベントを除去し、宇宙線のみでデータを評価を行っていく。

観測用シンチレーターを通過していないイベント

本実験では ADC、TDC のデータを読み込むトリガーを、上下の PMT が反応した場合にしている。シンチレーターの形状から、上下を通過していても間にある観測用のシンチレーターを通過していない、もしくは上のみ、下のみを通過したイベントでもトリガーにかかり、データを取得してしまう。これを取り除くため、PMT3 と PMT4 の ADC 次元ヒストグラムから、宇宙線ではない部分を判別しそのイベントを除いた。

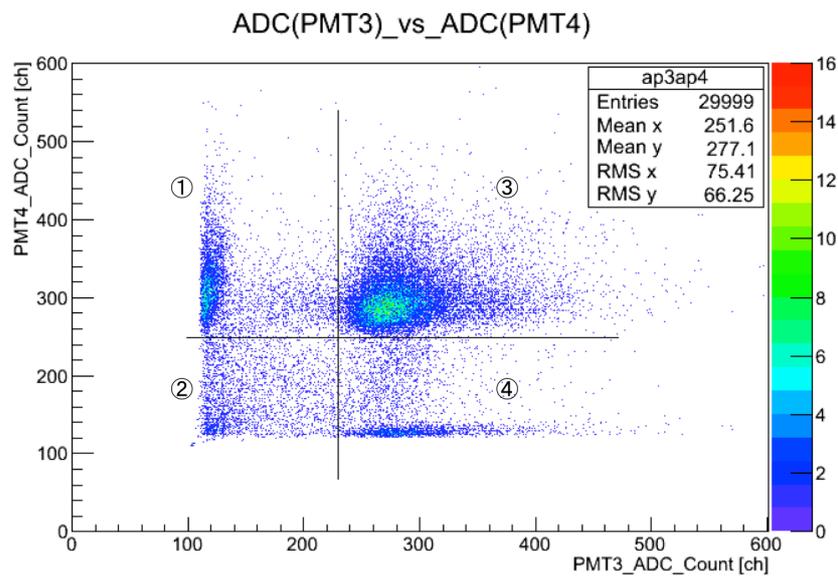


図 2.7 PMT3,4 の 2 次元ヒストグラム

図 2.7 における領域①と④は、上下のどちらか一方で宇宙線によるイベントが発生しており、もう一方ではノイズイベントが起きている。領域②ではどちらもノイズイベントであり、共に宇宙線のイベントが起こっているのは領域③である。

TDC で Overflow したイベント

PMT1,2 及び MPPC1,2 の TDC ヒストグラムより、Overflow (4095ch) となったイベントを取り除いた。これは TDC START に信号が入ったが各チャンネルに信号が入らず時間差が測れなかったものであるため、宇宙線によるイベントではないと判断した。

2.2.2 Time Walk Effect

各検出器からのアナログ信号（パルス）は、DISCRIMINATOR によってデジタル信号（NIM 信号）に変換される。この時、パルスの波高によって Threshold 電圧を越えるタイミングが変わり、結果として TDC の値はパルスの波高に依存する。これを Time Walk Effect といい、パルスの波高が低い、つまり低チャンネル側ほど立ち上がりが緩やかで TDC 値が大きく見積もられる。

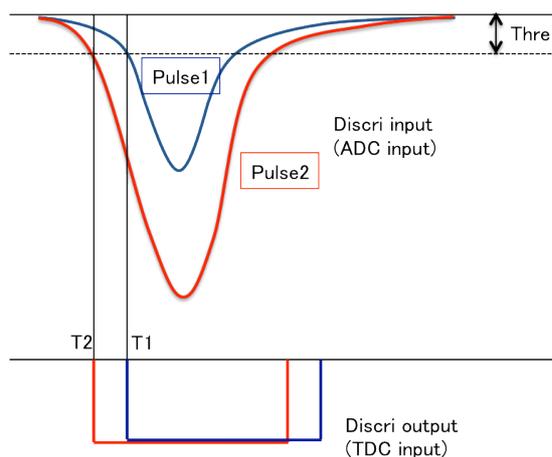


図 2.8 Time Walk Effect の概念図

Time Walk Effect の補正を行うことを Slewing Correction と呼び、ADC と TDC の相関のフィッティングから補正項を導き出して行う。しかし、この測定では PMT1,2 及び MPPC1,2 に関しては光源が同一のものであること、シンチレータが十分に小型であることからそれぞれの ADC ヒストグラムに正の相関があるため、Time Walk Effect がほぼ無視出来る十分な ADC 値以上の領域を取り出す方法を用いた。

2.2.3 時間分解能の計算

宇宙線のみデータをとり出したとしても、そこにはまだ不要な情報が含まれており、そのまま時間分解能を評価することが出来ない。MPPC の TDC 値には、主に以下の情報が含まれている。

- 上下のシンチレーターに対する光子の入射位置による揺らぎ・・・(a)
- PMT3, 4 に対する検出器由来の揺らぎ・・・・・・・・・・・・・・・・(b)
- 観測用シンチレーターに対する光子の入射位置による揺らぎ・・・(c)
- MPPC 自体に由来する揺らぎ・・・・・・・・・・・・・・・・(d)

最終的には(d)が求めたい時間分解能に相当する。そのためそれ以外の成分を取り除く必要がある。

まず初めに(c)について、観測用シンチレーターのどの部分に入射したかによって TDC の値は異なってくる。これは発光位置から MPPC 受光面までの距離依存性と言い換えられる。これを取り除くため、向かい合う MPPC 同士で TDC 値の平均をとる。

$$T_1 = \frac{TDC_{MPPC1} + TDC_{MPPC2}}{2} \quad (2.1)$$

(a), (b)に関しては TDC の START に影響を与えており、結果として得られた TDC 値は取り始めのタイミングがばらばらである。そのため START に信号が入ってからの時間差ではなく、同一イベント中における観測用シンチレーターに接続された PMT1, 2 の TDC 値との差をとる。このとき、PMT についても発光位置と受光面間の距離依存性があることから、PMT1, 2 の TDC 平均の値を用いる。

$$T_2 = T_1 - \frac{TDC_{PMT1} + TDC_{PMT2}}{2}$$

$$= \frac{1}{2}(TDC_{MPPC1} + TDC_{MPPC2} - TDC_{PMT1} - TDC_{PMT2}) \quad (2.2)$$

これをヒストグラムにすると、含まれているのは PMT1, 2 及び MPPC1, 2 それぞれに固有の揺らぎである。式で表すと、誤差伝播から以下のようなになる。

$$\sigma_T = \frac{1}{2} \sqrt{\sigma_{MPPC1}^2 + \sigma_{MPPC2}^2 + \sigma_{PMT1}^2 + \sigma_{PMT2}^2} \quad (2.3)$$

ここで、 σ_{PMT} は σ_{MPPC} に対し十分に小さく無視出来ることと、2つのMPPCの揺らぎはほぼ等しいという仮定を用いる。

$$\sigma_{MPPC1,2} \gg \sigma_{PMT1,2} \quad (2.4)$$

$$\sigma_{MPPC} \equiv \sigma_{MPPC1} \cong \sigma_{MPPC2} \quad (2.5)$$

これを(2.3)に適用すると、

$$\sigma_T = \frac{\sqrt{2}}{2} \sigma_{MPPC} \quad (2.6)$$

となり、MPPCの時間分解能は $\sigma_{MPPC} = \sqrt{2}\sigma_T$ となる。

以上のようにして宇宙線によるシンチレーション光測定の結果からMPPCの時間分解能を評価する。

3 章 実験及び解析結果と考察

3.1 宇宙線ヒストグラム

3.1.1 測定したデータのヒストグラム

測定したそのままのデータを以下に示す。この時点では ADC ペDESTAL の値を引いていない。なお、ペDESTAL の値は表 3.1 のようになる。

表 3.1 検出器ごとの ADC ペDESTAL 値

検出器	ペDESTAL 値[ch]	検出器	ペDESTAL 値[ch]
PMT1	105	MPPC2	127
PMT2	114	PMT3	104
MPPC1	148	PMT4	112

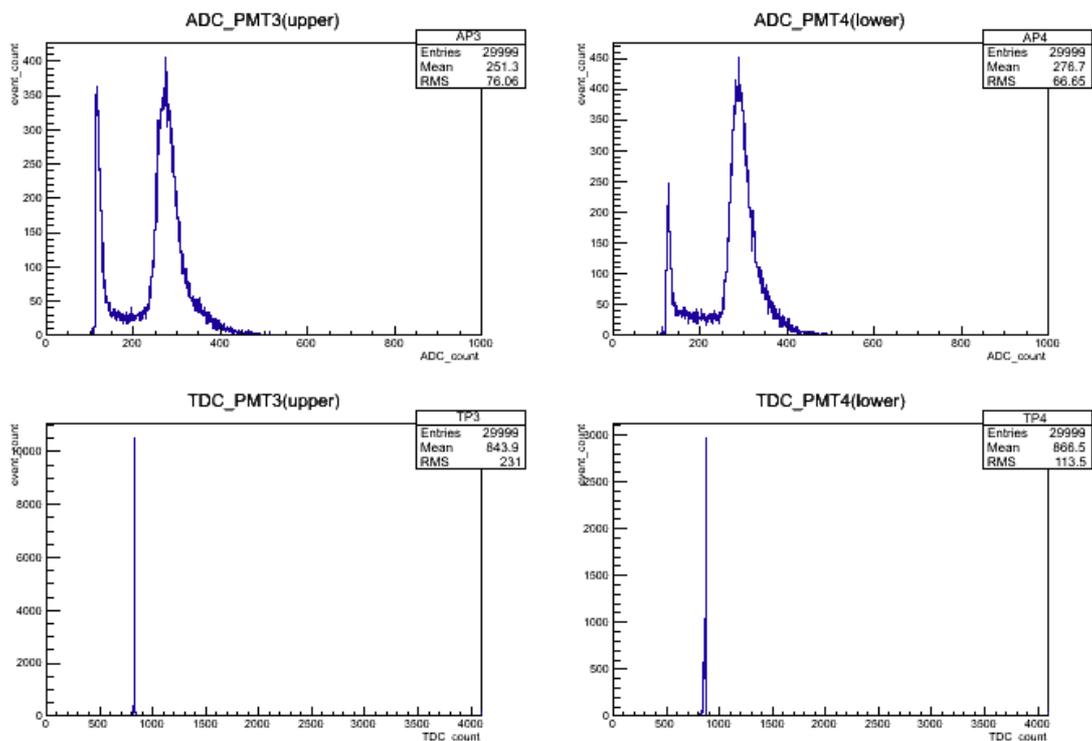


図 3.1 PMT3, 4 の ADC 及び TDC ヒストグラム

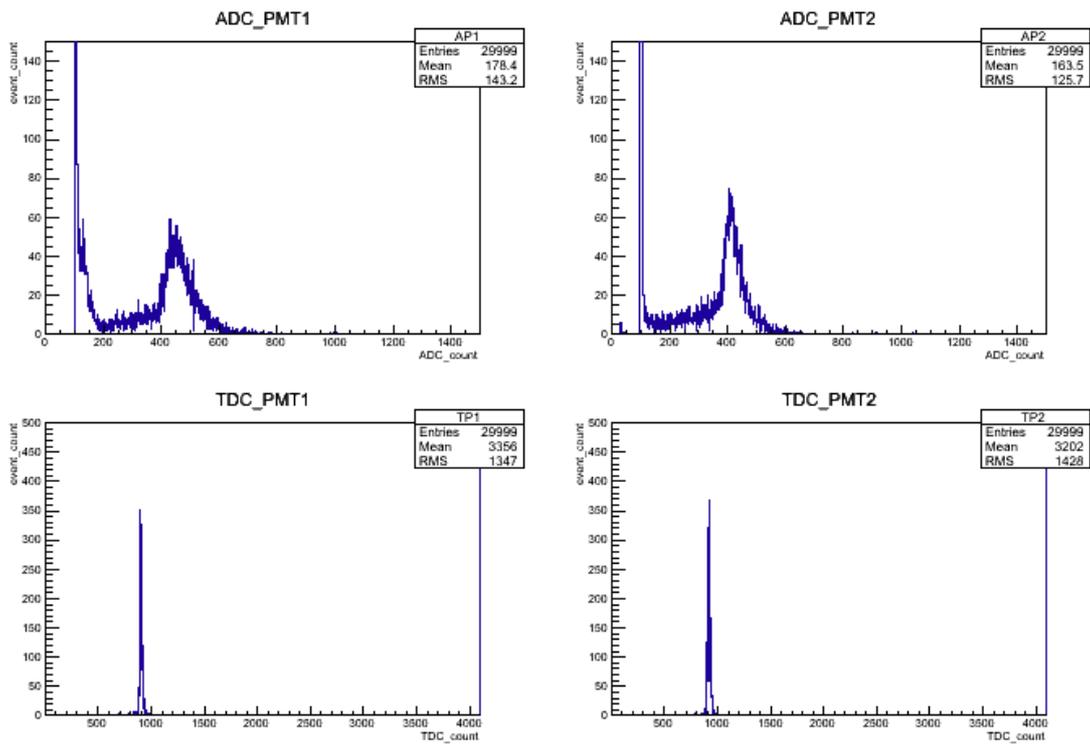


図 3.2 PMT1, 2 の ADC 及び TDC ヒストグラム

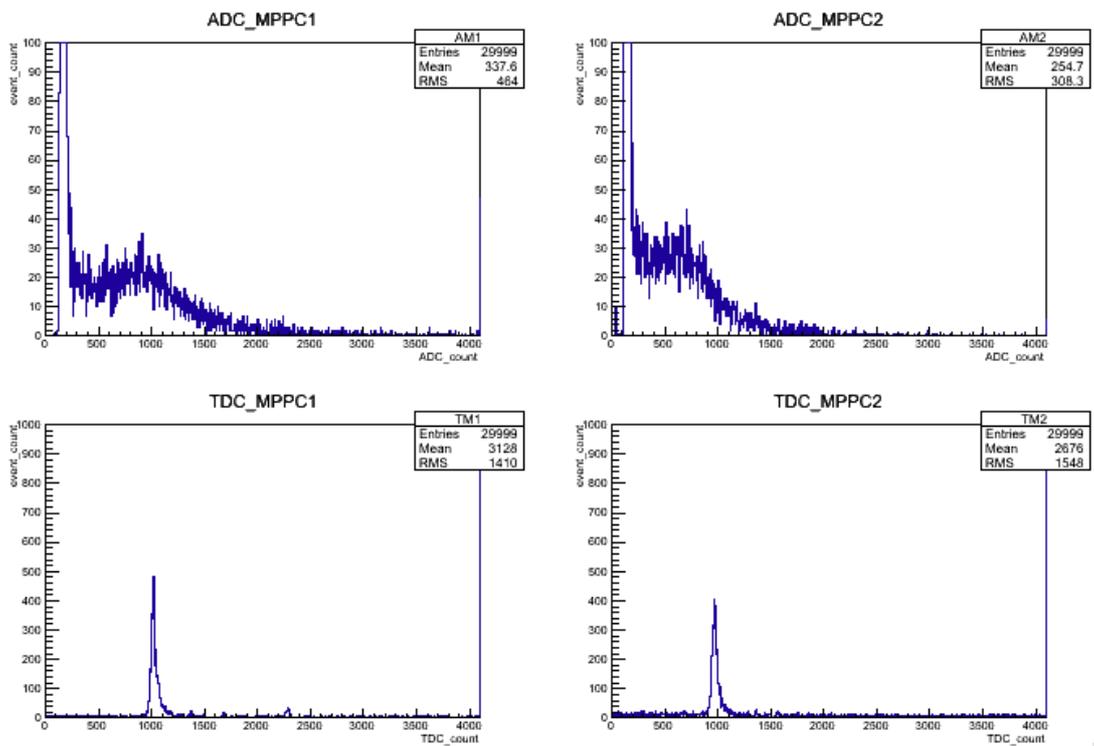


図 3.3 MPPC1, 2 の ADC 及び TDC ヒストグラム

3.1.2 宇宙線以外のイベント除去後のヒストグラム

前章で述べた通りに宇宙線のためのイベントを取り出す。まずは中央のシンチレーターを通過し、TDC 値が Overflow していないイベントを取り出し描画した。

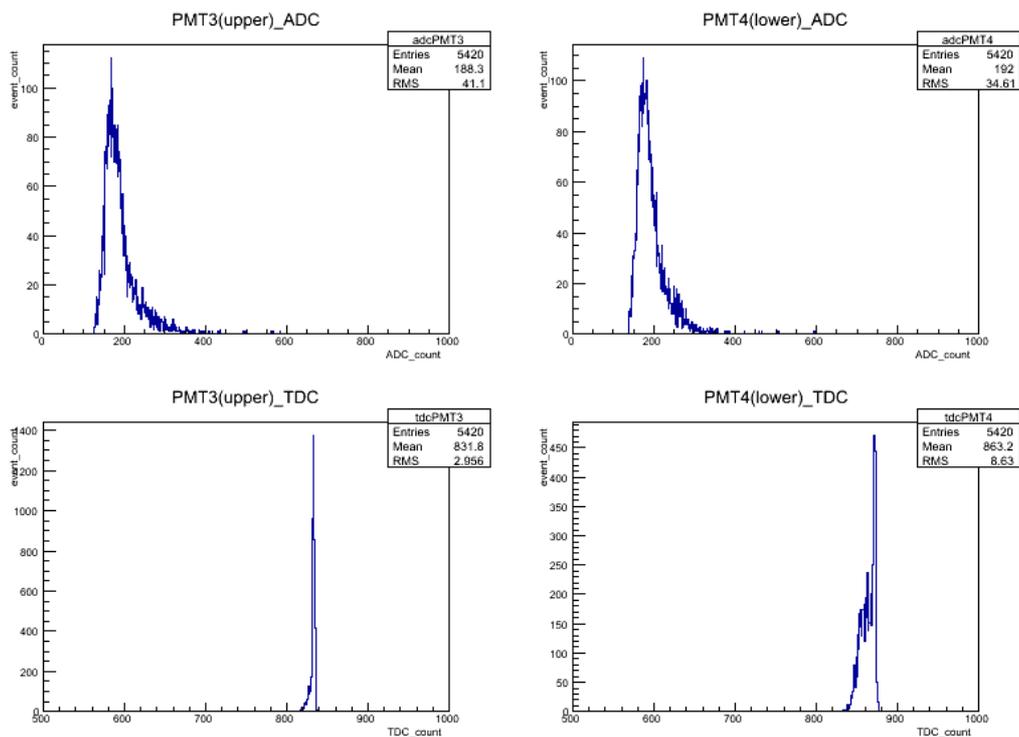


図 3.4 PMT3, 4 の ADC 及び TDC ヒストグラム (宇宙線のためのイベント)

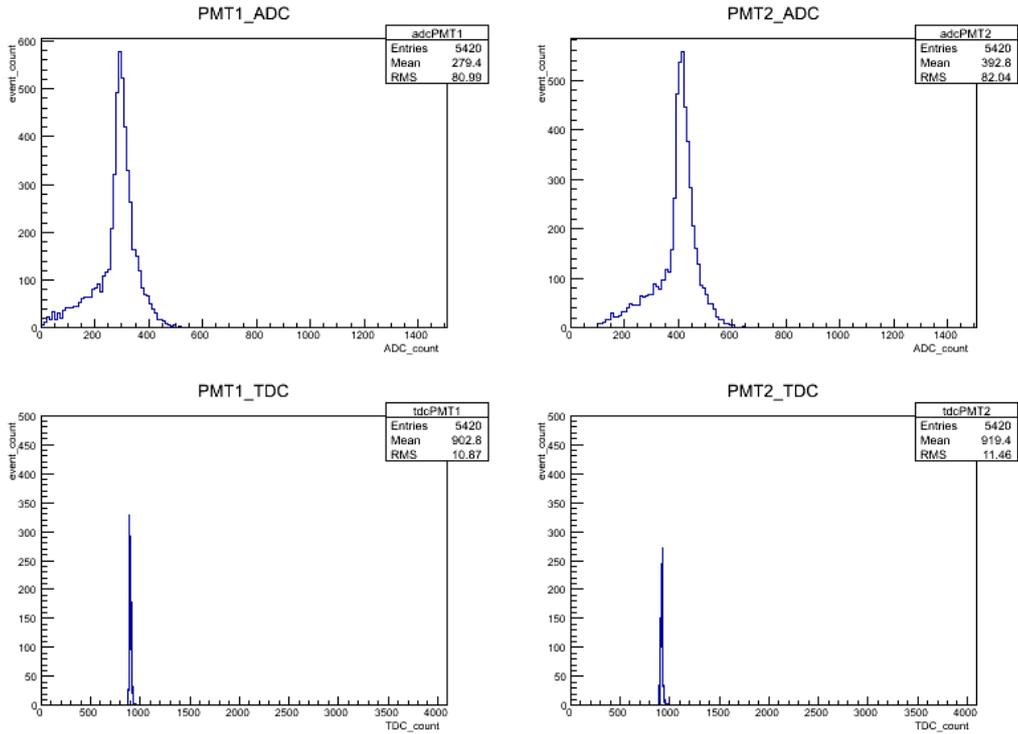


図 3.5 PMT1, 2 の ADC 及び TDC ヒストグラム (宇宙線のためのイベント)

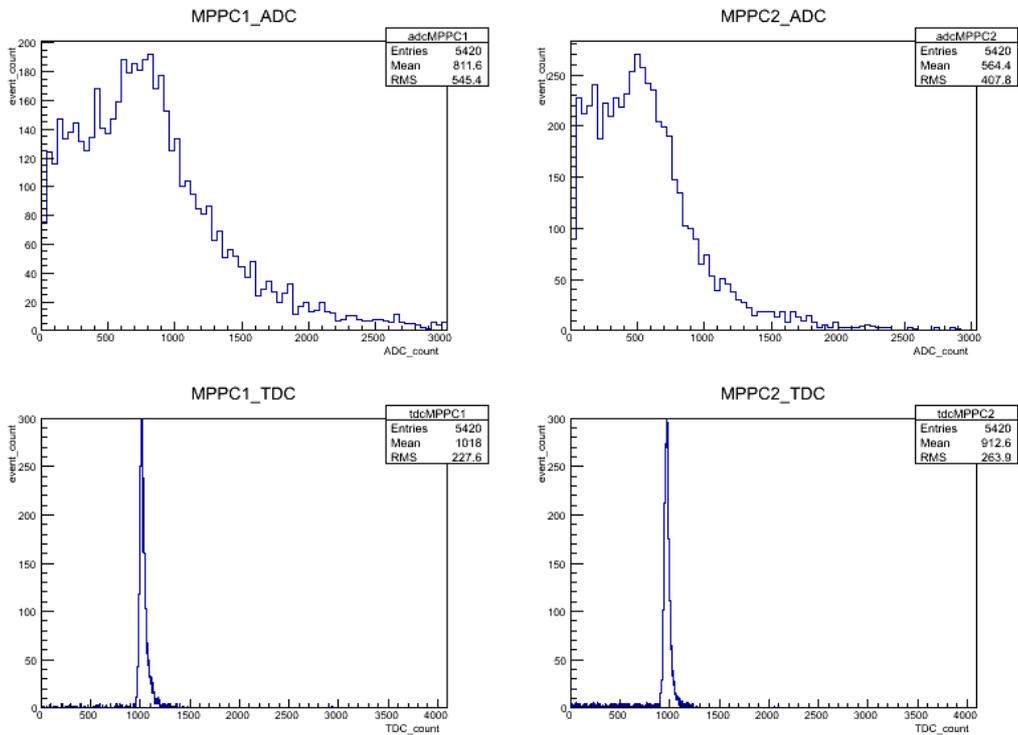


図 3.6 MPPC1, 2 の ADC 及び TDC ヒストグラム (宇宙線のためのイベント)

3.1.3 Time Walk Effect の補正

次に、Time Walk Effect を取り除く。それ以上であれば Time Walk Effect が十分無視出来る ADC 値を設定するために、PMT1, 2 及び MPPC1, 2 の ADC ヒストグラムをガウス関数+指数関数でフィッティングを行った。そのときのガウス関数のパラメータ σ の値 (図 3.7 ではパラメータ p4) を求め、mean 値から -1σ の値を基準として設定した。宇宙線のイベントが十分に含まれ、なおかつ Time Walk Effect がほぼ無視することが出来る。

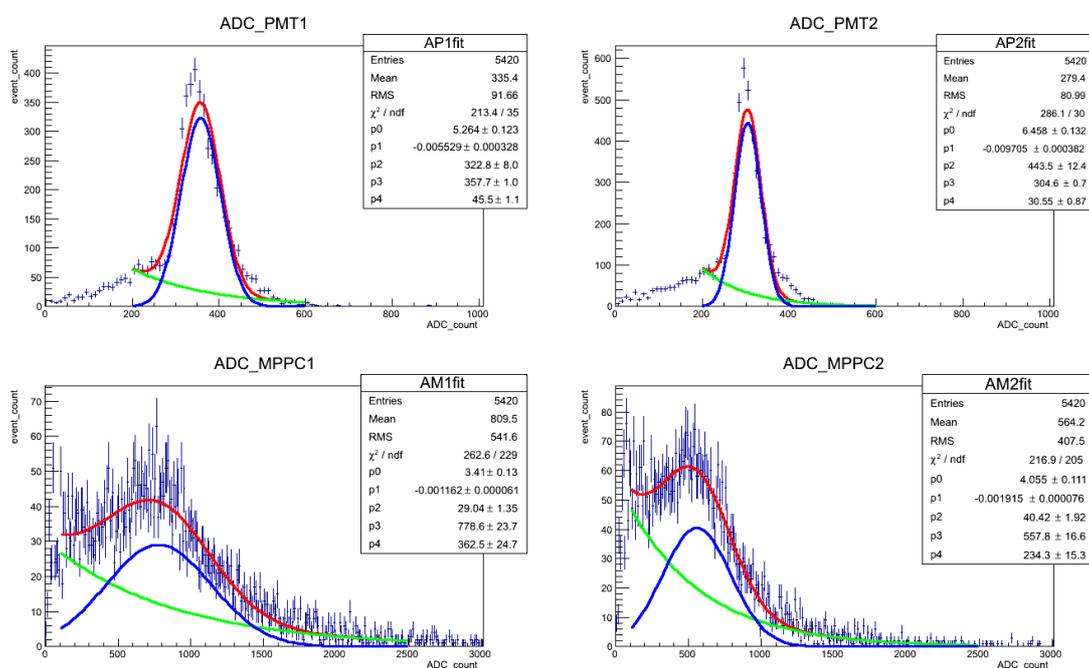


図 3.7 PMT1, 2 及び MPPC1, 2 の ADC ヒストグラムのフィッティング

青色がガウス関数、緑色が指数関数、赤色がそれらの合成関数

表 3.2 検出器ごとの Time Walk Effect 補正用 ADC 基準値

検出器	-1σ from Mean [ch]
PMT1	312
PMT2	274
MPPC1	416
MPPC2	324

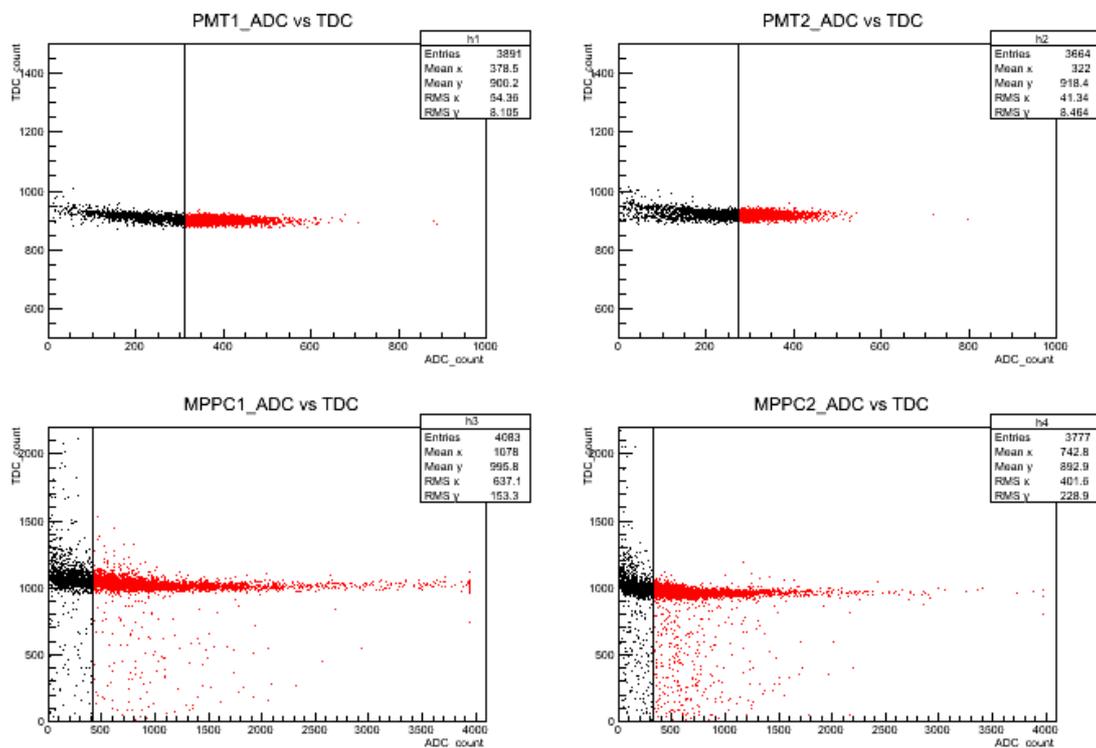


図 3.8 PMT1, 2 及び MPPC1, 2 における ADC-TDC 相関
 図 3.7 より取得した ADC 基準値を境に、黒色の領域を除去し
 赤色の領域イベントから時間分解能を評価する。

3.2 時間分解能

3.2.1 Time Walk Effect の補正を行ったデータによる時間分解能

それぞれの検出器の場合で得られた ADC 基準値によるカットをかけ、補正したデータから式 (2.2) の T_2 を計算、ADC との 2 次元ヒストグラムと T_2 単体の 1 次元ヒストグラムを得た。1 次元ヒストグラムについては横軸を [ps] に変換し (25[ps/ch])、ガウス関数でのフィッティングを行った。

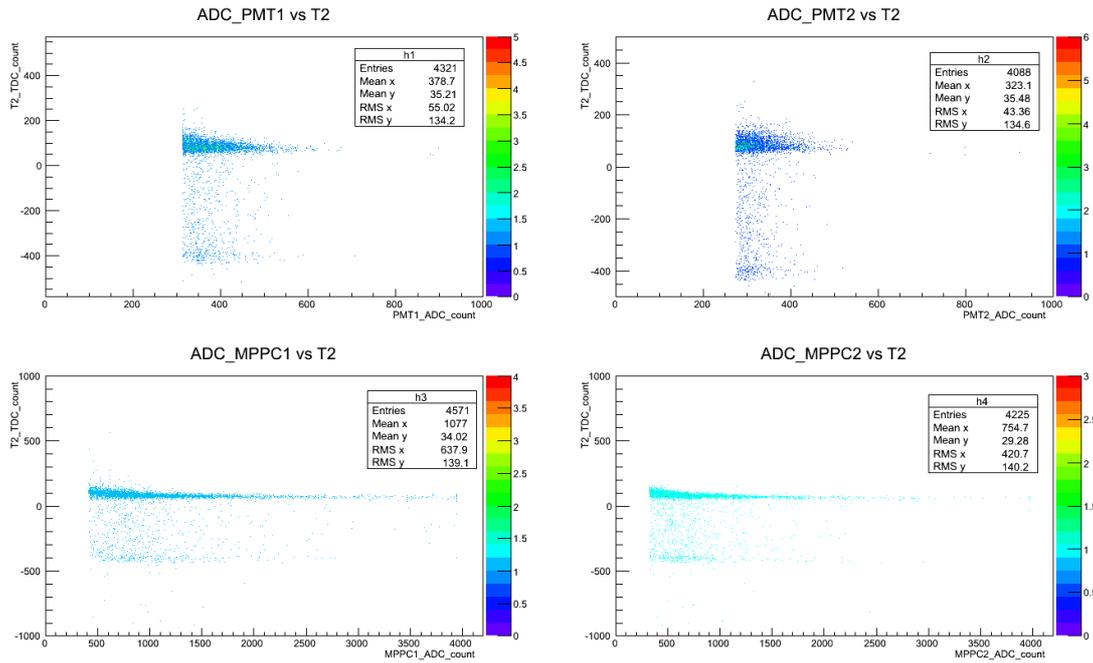


図 3.9 4つの検出器それぞれの ADC と T_2 との 2次元ヒストグラム

横軸は検出器ごとの ADC 値[ch]、縦軸は式(2.2)の T_2 [ch]

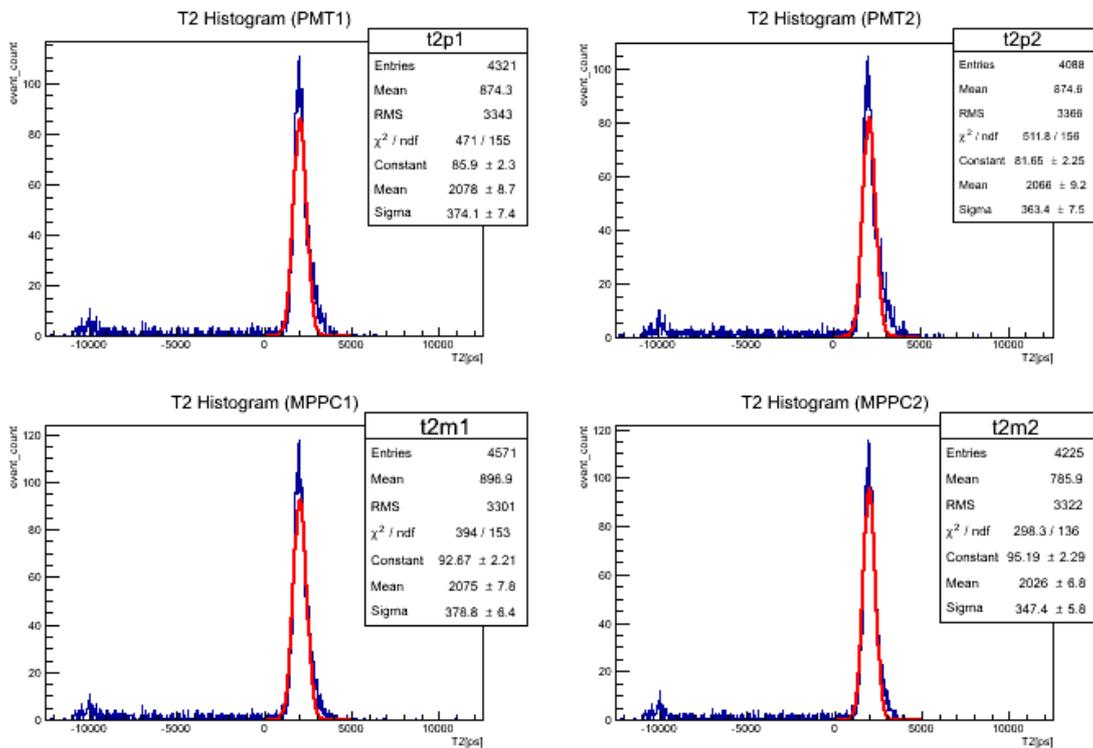


図 3.10 4つの検出器それぞれの T_2 1次元ヒストグラム

横軸は[ps]に変換し、ガウス関数でフィットした。

フィッティングの結果より、式 (2.6) から時間分解能を計算した。

表 3.3 各検出器別 ADC 基準値による補正後の MPPC 時間分解能

カット条件	MPPC 時間分解能 [ps]
PMT1 ADC > 312[ch]	529.1 ± 10.5
PMT2 ADC > 274[ch]	513.9 ± 10.6
MPPC1 ADC > 416[ch]	535.7 ± 9.1
MPPC2 ADC > 324[ch]	491.3 ± 8.2

また、ADC 基準値以上という条件を 4 種類全て満たすイベントについて、 T_2 の 1 次元ヒストグラムを取得した。

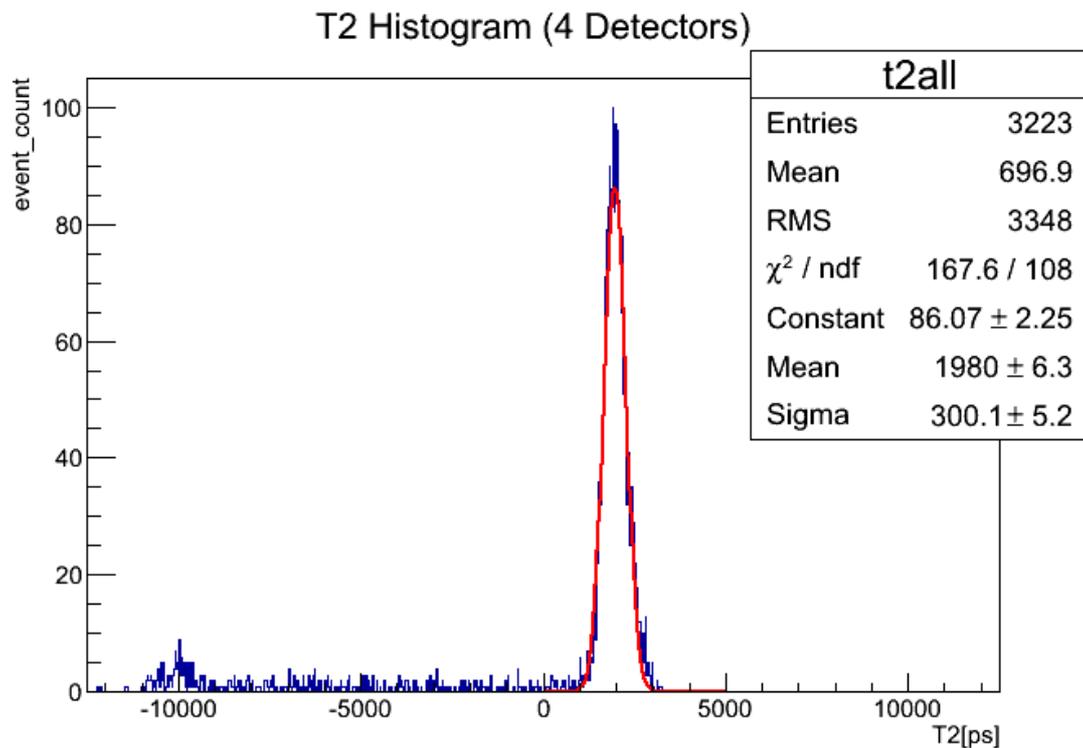


図 3.11 4 種類全ての ADC 基準値を上回るイベントでの T_2 1 次元ヒストグラム

この場合の MPPC 時間分解能は、式 (2.6) より 424.4 ± 7.4 [ps] となった。

3.3 時間分解能に関する考察

本実験では、Time Walk Effect が無視できる領域のイベントを取り出し、2つの MPPC の TDC 平均値から PMT の TDC 平均値を引くことで不要な揺らぎを除去し時間分解能を計算した。しかし、この方法以外にも MPPC の時間分解能を評価する方法がある。ここでは 2 通りの方法について述べる。

3.3.1 同時フィッティングによる時間分解能評価法

時間分解能を評価する別の方法の 1 つとして、式(2.2)の T_2 と各検出器の ADC との 2 次元ヒストグラムから Slewning Correction を行い、得られた T_2 の 1 次元ヒストグラムを用いて、時間分解能を評価する方法がある。これは最も一般的でなおかつ厳密なやり方であり、4 つ検出器での 2 次元ヒストグラム全てで同時にフィッティングを行い、最適な Slewning Correction を適用することができる。しかし、本実験ではすでに述べた通り、今回行った方法で時間分解能の評価をすることが可能だったため、2 章 2.2 で述べた方法を採用した。

3.3.2 検出素子の組み合わせによる時間分解能評価法

今回行った方法以外の MPPC 時間分解能を評価する方法のもう 1 つとして、観測用のシンチレータに接続された 4 つの検出器 (PMT1, 2 及び MPPC1, 2) の TDC 値の差分をとり、得られたヒストグラムの標準偏差 σ から時間分解能を計算する方法がある。差分をとることで上下の PMT 由来の揺らぎは除去され、4 つの検出器それぞれの固有の揺らぎと、光子の入射位置に依存する揺らぎが残される。ここで観測用シンチレータが十分に小さく、入射位置による影響が無視出来ると考える。差分の取り方は全部で 6 種類あり、各々についてガウス関数でフィッティングを行い、標準偏差 σ を求める。

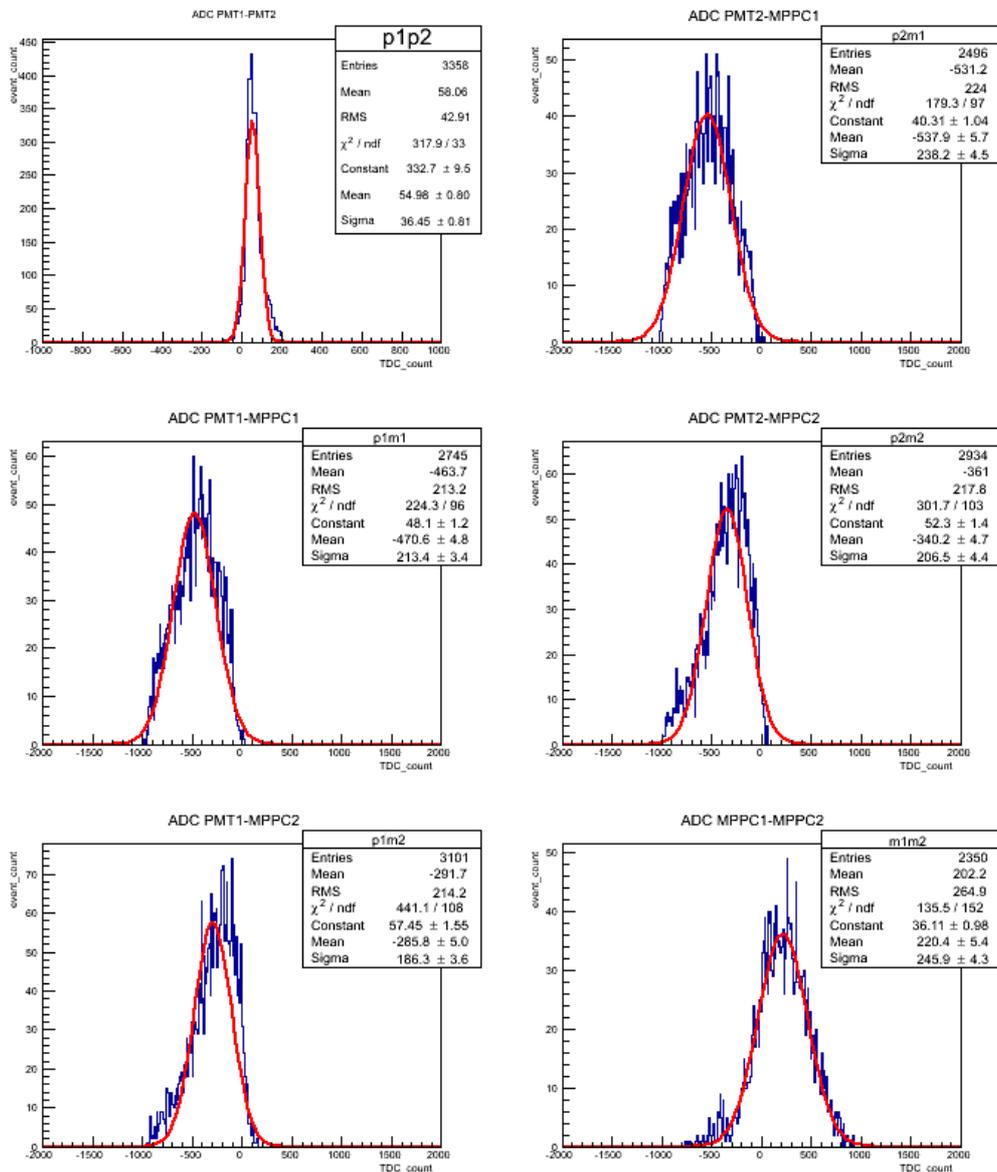


図 3.12 PMT1, 2 及び MPPC1, 2 の TDC 差分ヒストグラム

誤差の伝播から考えると、検出器固有の時間分解能 σ と差分ヒストグラムの標準偏差 σ の間には、以下の関係があることが分かる。以下、PMT1, 2 のことを P1, P2、MPPC1, 2 のことを M1, M2 と表現する。

$$\left\{ \begin{array}{l} \sigma_{P1-P2}^2 = \sigma_{P1}^2 + \sigma_{P2}^2 \\ \sigma_{P1-M1}^2 = \sigma_{P1}^2 + \sigma_{M1}^2 \\ \sigma_{P1-M2}^2 = \sigma_{P1}^2 + \sigma_{M2}^2 \\ \sigma_{P2-M1}^2 = \sigma_{P2}^2 + \sigma_{M1}^2 \\ \sigma_{P2-M2}^2 = \sigma_{P2}^2 + \sigma_{M2}^2 \\ \sigma_{M1-M2}^2 = \sigma_{M1}^2 + \sigma_{M2}^2 \end{array} \right. \quad (3,1)$$

これら 6 つの方程式を満たすように、左辺の測定値を最もよく再現するような各検出器の時間分解能 σ の組み合わせを求めることが、この評価法の骨子である。各素子の時間分解能を各々求めることができるところに最大の利点がある。本論文の結果と比較し、評価方法による時間分解能の系統的な差異を求めることが今後の課題の 1 つである。

4 章 結論

本研究では、次世代の光子検出器である MPPC の性能評価実験の 1 つとして、側面に 4 つの検出器を取り付けたプラスチックシンチレーターを用いて、宇宙線によるシンチレーション光を測定した。得られたデータに対し宇宙線イベントのみを取り出すカットを適用し、さらに **Time Walk Effect** に対する補正を行った。この補正は本実験独自の方法であり、光源が 1 つであることとシンチレーターが小型であることから各検出器の ADC データに線形性があるために、ADC 値の高い領域のイベントで評価を行った。式(2,2)のヒストグラムのフィッティング結果から、MPPC のもつ時間分解能は $424.4 \pm 7.4[\text{ps}]$ という値となった。

今回使用した評価法以外にも MPPC の時間分解能を求める方法があり、それについても時間分解能の評価を行い、今回の結果と比較していくことが今後の課題となる。

参考文献

- [1] 原子核物理学 永江知文・永宮正治 共著 裳華房
- [2] 素粒子物理学 原康夫 著 裳華房
- [3] MPPC の特性改善情報 里健一
第 4 回次世代光センサーに関するワークショップ兼 EASIROC 研究会 講演資料
2012 年 12 月 25, 26 日開催

謝辞

本研究を行うにあたり、研究室の皆様には大変お世話になりました。指導教官である杉立先生には、実験を行う上での心構えや気をつけるべき点など多くのこと教わりました。1つの結果を得るために何を、どのようにして手をつけていくべきかを常に考え、先のことを予想しながら研究を行うという姿勢はこれまでの自分に足りなかったもので、非常に重要なことであることを学びました。中宮さんには、データ解析の方法について多くのアドバイスを頂き、また自分が気付いていなかった事や失念していたことを指摘していただいたことが幾度もありました。本当に感謝しています。M1の佐藤さんと大久保さんには、性能評価実験に途中から参加した自分にMPPCについての基礎知識や実験手法などを丁寧に教えて頂きました。志垣先生には前期のLab Exerciseで研究活動の基礎を指導して頂きました。また杉立先生、本間先生と共に進捗報告の場で適切な意見やアドバイスを頂き、その後の活動に大いに役立ちました。三次先生にはセミナーでお世話になり、原子核物理学の理解が進みました。そのほかにも研究室の先輩・スタッフの皆様には常に親身になって接して頂き、物理に関する興味深い話なども沢山聞くことができました。本当に感謝しています。最後になりますが、同期の皆さんには助言を与え合うなどして、日々楽しみながら研究活動を行う事ができました。特に関畑君には研究内容が近く、また自分よりも一足早く性能評価に参加していたこともあって色々な事を教えてもらいました。

1年間の研究活動を行い、本論文を無事に書き終えることが出来たのは、クォーク物理学研究室の皆様のおかげです。本当にありがとうございました。